

論文

[1120] 逆打コンクリート用混和材の開発とその効果

正会員○両角昌公(竹中工務店技術研究所)

正会員 高幣喜文(竹中工務店技術研究所)

正会員 北野勝康(竹中工務店技術研究所)

1. はじめに

地下構造物を逆打工法で構築する場合、その打継ぎ部にはブリージング水やコンクリート自身の圧密沈下によって間隙(図-1)が生じる。この間隙は、柱部材では軸力の伝達を妨げ、地下外周壁で、かつ地下水位が高い場合には漏水の原因ともなる。また、鉄筋が露出していることも考えられるため将来に亘ってコンクリート構造体としての耐久性にも悪影響を与える。

一方、この間隙を補償する工法、即ち逆打打継ぎ処理技術としては①直接法、および②注入法の二種類の方法が提案・実用化されている。

このうち注入法は、意図的に適度な間隙を作った上で、この間隙にセメント系、或るいはエポキシ樹脂を圧力注入し構造体を一体化する方法である。このため間隙に対する充填性が高く、実際の工事ではこの方法がよく採用されている。

一方、直接法は、コンクリート自身に膨張材、或るいはノンブリージング材等の特殊混和剤(材)を添加し積極的に打継ぎ部の間隙を補償しようとする方法である。しかし、間隙発生の主要原因であるブリージングやコンクリート自身の圧密沈下は、コンクリートの使用材料の物理的特性や施工時期によっても異なることから特殊混和剤のみで、この間隙を制御・補償することは困難である。従って、注入法に比べて「構造物の一体化」に対する確実性は劣ると言える。反面、注入法に比べて作業工数が少なく施工費が安価である等の利点も有していることから、直接法に対しては、より信頼性の高い工法の開発が望まれている。

本報告は、メチルセルロース(MC:ノンブリージング材)と特殊アルミニウム(AE:膨張材)を主成分とする逆打打継ぎ用混和剤(以後、TM-5と称す)を柱並びに地下外周壁を模擬した実大試験体に直接法として適用し、その効果を注入法と比較検討した結果について述べたものである。なお、比較した特性は、TM-5を混入したコンクリートの一般的な物理的性質、打継ぎ部の曲げせん断性能(柱部材)、並びに打継ぎ部の止水性能(地下外周壁)等である。また、本報では、漏水部の新しい補修方法として、イソシアネート系樹脂による注入法を提案し、これを地下外周壁漏水部に適応した結果とその効果についても併せて述べる。

2. 打継ぎ用混和剤(材)の現状と本工法の開発目的

柱部材における軸力の伝達性能、並びに地下外周壁における止水性を確保するための打継ぎ処理法としては、従来、直接法に比べて注入法が優れていた。一方、直接法は、注入法に比べて作業工数が少なく安価である等の利点を有している。しかし、現在、直接法で用いられるコンクリート用混和剤の多くは、混和剤の持つ特性から図-1に示す間隙を十分に補償することは難しい。通常、打継ぎ部の間隙は、ブリージング水に起因する間隙とコンクリート自身の圧密沈下に起因する間隙の和で構成される。しかし、表-1に示すように、現在市販されている打継ぎ用

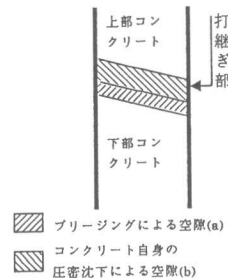


図-1 打継ぎ部における空隙発生概念

混和剤は、ブリージング水の低減、或るいは膨張性を主目的に開発されており、打継ぎ部の間隙を十分に補償することは困難と思われる。即ち、ブリージングの低減を目的とした打継ぎ用混和剤は、コンクリート自身の圧密沈下に起因する間隙を補償することは難しく、膨張性混和剤は、ブリージング水の発生を精度よく予測した上で膨張量を設定することは難しく、更に、ブリージングに起因するレイタンスは打継ぎ部に欠陥を生じさせる原因ともなる。

このような背景から、直接法では、不確定要素の高いブリージング水を極限まで低減させた上で、コンクリート自身の圧密沈下のみを膨張剤で補償する方法が最も効果的と思われる。従って、本工法で提案するノンブリージング膨張剤は、直接法で間隙を補償するための手段としては適切、かつ合理的な打継ぎ処理法と言える。

3. 検証実験の方法

3.1 検証実験の構成(因子と水準)

TM-5の直接法に対する効果に関する検証実験は、①柱部材の曲げせん断特性および②地下外周壁の止水性に関する評価実験の2種類の実験で構成した。表-1には、その実験の組合せを示す。

3.2 コンクリートの材料および調合

本実験では、B社製の生コンクリートを使用した。コンクリート用材料の詳細を以下に示す。

- a) セメント : 普通ポルトランドセメント ($\rho=3.16$ 、O社製)
- b) 細骨材 : 砕砂 ($\rho=2.57$ 、兵庫県室木産)
- c) 粗骨材 : ($\rho=2.64$ 、兵庫県西島産)
- d) 混和剤(材)・AE減水剤標準形 (A社製)
- ・ノンブリージング膨張材 : TM-5

また、普通コンクリート並びにTM-5混入コンクリートの調合条件は以下に示すとおりで、その調合を表-3に示す。なお、TM-5の混入率は、単位セメントに対して0.3%/wである。

- a) 呼び強度 : 240kgf/cm²、
- b) スランプ : 18±2.5cm、
- c) 空気量 : 4±1%、
- d) 粗骨材の最大寸法 : 20mm、

3.3 使用鉄筋

鉄筋(柱主筋、およびせん断補強筋)は、JISG-3112および3117(鉄筋コンクリート用棒綱)に適合するものを使用した。その力学的試験結果を表-4に示す。

3.4 逆打柱の曲げせん断実験

(1) 試験体

表-1 直接法で用いるコンクリートの種類と間隙の補償

| 後打ちコンクリートの種類 | 間隙量(図-1) | 間隙量の補償 | 間隙量の補償 |
|---------------------|----------|------------------------|-----------------------|
| 1. AEコンクリート | a+b | 補償できない | — |
| 2. 膨張コンクリート | a+b | 膨張量(a) $a \geq a+b$ | ブリージング量に対する膨張量の設定が困難 |
| 3. ノンブリージングコンクリート | b | aのみ補償 | 圧密沈降による間隙の補償は不可能 |
| 4. ノンブリージング膨張コンクリート | — | 膨張量(a) $a \geq b$ | 圧密沈降による間隙のみ補償のため管理が容易 |

表-2 実験の組合せ

| 記号 | 実験目的 | 部材 | コンクリートの種類 | | 打継ぎ処理 | | | |
|----|--------|----|---------------|------|--------|------|----------------------|---|
| | | | 上部コン | 下部コン | 隙間厚 | 処理方法 | 注入圧力 | |
| W1 | 止水性能 | 壁 | 普通コンクリート(NPC) | NPC | — | 無処理 | — | |
| W2 | | | | | 3mm | 注入法 | 8kgf/cm ² | |
| W3 | | | | | TM-5混入 | — | 直接法 | — |
| P1 | 曲げ剪断性能 | 柱 | 普通コンクリート(NPC) | NPC | — | 注入法 | 8kgf/cm ² | |
| P2 | | | | | TM-5混入 | — | 直接法 | — |
| P3 | | | | | NPC | — | 一体打ち | — |

表-3 コンクリートの調合

| コンクリートの種類 | 単位量(kg/m ³) | | | | | |
|-----------|-------------------------|---------|--------|--------|----------|--------|
| | 水(W) | セメント(C) | 細骨材(S) | 粗骨材(G) | 化学混和剤(材) | |
| | | | | | AE減水 | TM-5 |
| NPC | 191 | 347 | 784 | 950 | C×0.25% | — |
| TM-5混入 | — | — | — | — | — | C×0.3% |

表-4 使用鉄筋の特性

| 鉄筋の種類 | 降伏応力度(kg/mm ²) | 引張応力度(kg/mm ²) | 静弾性係数(×10 ⁴ kg/mm ²) | 伸び率(%) |
|----------|----------------------------|----------------------------|---|--------|
| D-25主筋 | 36.7 | 54.3 | 1.84 | 18.9 |
| D-13剪断補強 | 37.6 | 54.0 | 1.76 | 19.2 |

図-2には、試験体の形状、並びに主な配筋状態を示す。また、配筋等試験体の設計条件は表-5に示すとおりである。次に下部コンクリートの打設は、上部コンクリート打設後14日目とした。また、注入法におけるセメントペーストの注入は、下部コンクリートを打設したのち10日目に8kgf/cm²の注入圧で行った。

(2) 載荷方法

載荷方法は、大野式曲げせん断加力方法を採用した。載荷方法の模式を図-3に示す。なお軸力は、PC綱棒と油圧ジャッキを併用し、導入力を40kgf/cm²一定で制御した。次に、載荷サイクルを図-4に示す。載荷サイクルは、柱脚に対する柱頭の水平相対変位を柱長で除した部材角を基準とする正負の繰り返し載荷とした。なお、試験材令は、下部コンクリート施工後約50~60日である。実験は、試験体各部の変形並びに応力状態の測定を主体とした。図-5には、変位並びに鉄筋のひずみ測定位置および応力状態を示す。

3.5 地下外周逆打壁の止水性実験

(1) 試験体

図-2に試験体の形状並びに配筋状態を示す。なお、鉄筋は縦・横筋ともにD-10を@200mmで配筋した。また、上部並び

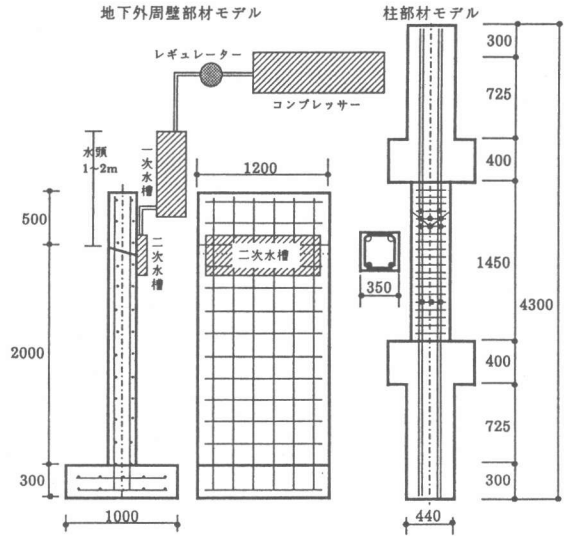


図-2 試験体の形状

表-5 曲げ剪断試験用試験体の設計仕様

| 項目 | 設計仕様 | |
|------|-------------------------------------|------------------|
| 柱 | 断面積 | b×d=350×350mm |
| | 柱長(ℓ) | 1,450mm |
| | 打継ぎ位置 | ℓ/4 |
| 剪断 | 剪断スパン比 | 2.07 |
| | 種類 | 4-D25 |
| 主筋 | 鉄筋比(%) | 1.66 (主筋断全面積) |
| | 剪断補強 | フープ筋 2-D13、@70mm |
| 剪断補強 | Q _{su} /Q _{mu} 1) | 1.2 (曲げ降伏先行) |
| 剪断補強 | フープ筋 | 2-D13、@70mm |

1) 曲げ降伏時剪断力(Q_{su})に対する最大剪断強度(Q_{mu})の比

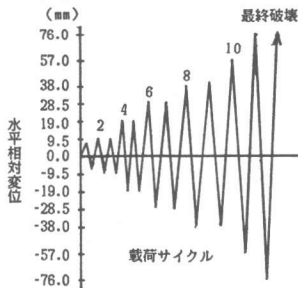


図-4 載荷サイクルと水平変位の関係

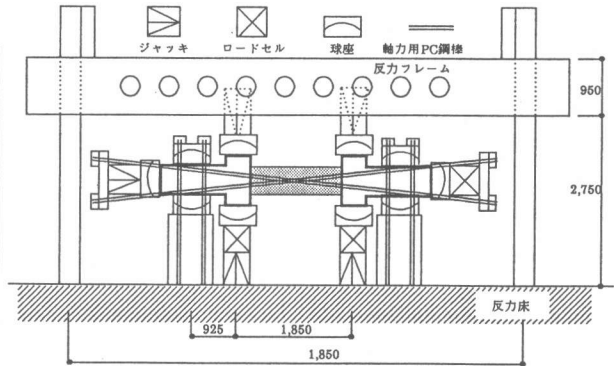


図-3 載荷方法の模式

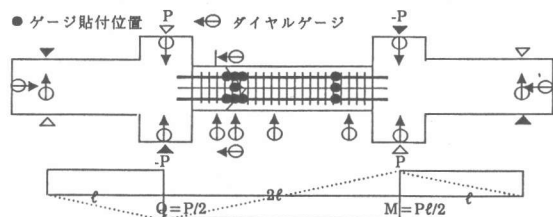


図-5 変位、ひずみ測定位置および応力状態

に下部コンクリートの打設、並びに注入法におけるセメントペーストの注入、および試験材令は全て3.4項に準拠した。

(2) 加水圧方法

打継ぎ部に対する加水圧の方法を図-2の試験体の形状に併せて示す。水圧は0.1、0.3、1.0、2.0、2.5、3.0および3.5kgf/cm²の7水準とし、0.1並びに0.2kgf/cm²については1m並びに2mの水頭で加圧し1.0~3.0kgf/cm²については、エアークンプレッサーと圧力調整弁で加圧・制御した。なお、加圧材令は任意(漏水の有・無確認まで)とした。

4. 試験結果と考察

4.1 使用したコンクリートの物理的特性試験

表-6には、コンクリートの物理特性を示し、図-6にはコンクリート容積変化を示す。

(1) まだ固まらないコンクリートの性質

普通コンクリート(以後NCと称す)、並びにTM-5混入のブリージング率は、それぞれ5.5、並びに0.8%である。また、NC、並びにTM-5混入の膨張量は、それぞれ-0.24(圧密による降下)、並びに0.45%であった。

表-6 コンクリートの物理的性質

以上から、TM-5混入の膨張量は、TM-5混入のブリージングよりも大きいことから、この効果によって打継ぎ部に生じる間隙を補償できるものと考えられる。

| 打設部位 | コンクリートの種類 | まだ固まらないコンクリートの性質 | | | | | 硬化コンクリートの性質 | | | | | | | |
|------|-----------|------------------|--------|--------|-----------|--------|-----------------------------|-----|------|-----|------|-----|------|---|
| | | スランブ(cm) | 空気量(%) | 温度(°C) | ブリージング(%) | 膨張率(%) | 圧縮強度(kgf/cm ²)* | | | | | | | |
| | | | | | | | 1W | | 4W | | 試験時 | | | |
| 上部 | 普通コンク | 19.0 | 4.0 | 21.0 | - | - | 標準 | 密封 | 標準 | 密封 | 密封 | 密封 | 24.3 | |
| | リート | 19.0 | 4.4 | 16.0 | 5.5 | -0.24 | 215 | 179 | 356 | 282 | - | - | | |
| 下部 | TM-5 | ベース | 14.0 | 3.3 | 15.0 | - | - | 236 | 2.43 | 356 | 3.10 | - | - | - |
| | | 混入後 | 16.5 | 2.9 | 15.7 | 0.8 | 0.45 | 215 | 198 | 318 | 275 | 315 | 21.0 | |

* 下段は静弾性係数(×10⁵kg/cm²)を示す

(2) 硬化したコンクリートの性質

圧縮強度に及ぼすTM-5混入の影響を標準水中養生した材令28日の圧縮強度で比較すれば、TM-5混入前の圧縮強度が356kgf/cm²であるのに対して、混入後は318kgf/cm²で約10%低下している。なお、圧縮強度が低下した原因としては、供試体を作成する時点で特殊アルミニウムによる発泡を十分に拘束できなかったことが考えられる。

4.2 柱部材の曲げせん断試験

(1) 打継ぎ部における軸力の伝達

図-7には、軸力導入時に計測した鉄筋ひずみから鉄筋の軸力分担割合を示す。なお、同図には比較のため健全部の軸力分担も併せて示す。以上から、打継ぎ処理部の鉄筋には、健全部よりも大きな力が作用している。特に、P1試験体(セメントペースト注入法)の軸力分担は、P2試験体(TM-5混入の直接法)に比べて大きく、健全部の約2倍の21%を鉄筋が負担している。この原因としては、ペースト自身の剛性がコンクリートに比べて低いこと、および下部コンクリートを打設する際の過振動や再振動がコンクリートの沈降分離(特に、セメントペーストやブリージグ水の浮上)をより促進させ、結果的に打継ぎ部付近のコンクリートの品質、即ち、圧縮強度や静弾性係数などが低下していたものと考えられる。これに対して、P2試験体主鉄筋の軸力分担は、約

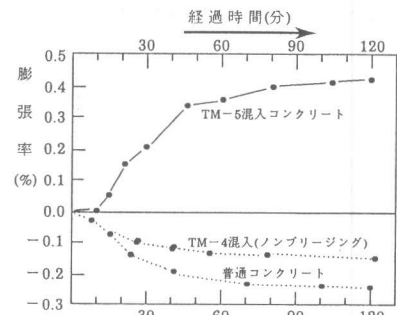


図-5 コンクリートの容積変化

14%で一体打ちのP3試験体と比べても大差ない値を示した。これは、TM-5の特性であるノンブリージング膨張効果による打継ぎ部の充填性の向上を示唆するものと考えられる。

(2) 破壊経過と状態

P1、P2およびP3試験体(一体打ち)の曲げせん断に関する実験から、せん断力(P/2)と部材角の関係(荷重～変形曲線)および最終破壊時のひびわれ状況を、図-8および9に示す。また、以上の結果から読み取った曲げせん断試験結果を表-7に一覧で示す。

破壊状況から、P2並びにP3試験体は、せん断力に対して12.3並びに7.1tonfで材端部に曲げひびわれが生じ、更に、20.1並びに17.0tonfで曲げせん断ひびわれに発展した。次に、降伏時のせん断荷重は、26.8、並びに26.4tonfで、その後、荷重の増加に伴いひびわれ巾も大きくなり、材

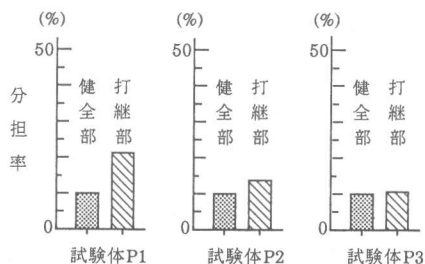


図-7 鉄筋の軸力分担割合

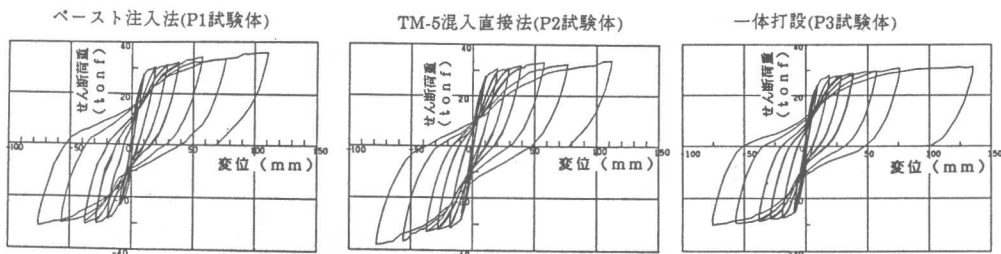


図-8 加重～変形曲線(P/2)

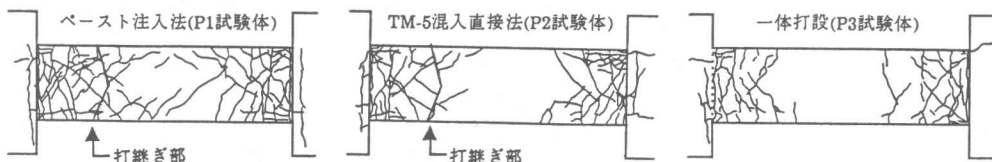


図-9 最終破壊時のひびわれ状況

端部が圧壊しながら36.1、並びに31.4tonf(水平相対変位100mm時)で破壊した。また、表-7には、比較対象であるP1試験体の結果も併せて示すが、曲げひびわれ時、曲げせん断ひびわれ時、降伏時、および破壊時のせん断力は、それぞれ7.6、24.2、28.4および38.9tonfでP2試験体の曲げせん断性能と同等な傾向を示している。

以上から、TM-5混入の曲げせん断性能は、一体打ち、並びに注入法と同等の性能を有していることから、TM-5の直接法への適応性は極めて高いものと考えられる。

4.2 地下外周壁の止水性に関する実験

地下外周壁を模擬したW1(AEコンクリート、無処理)、W2(AE、注入法)およびW3(TM-5混入)試験体の止水性に関する試験結果を表-8および図-10に示す。

(1) W1試験体の止水性能(無処理)

写真-1には、水頭圧0.1kgf/cm²の漏水状況を示すが打継ぎ部全面からの漏水が認められた。そこで、間隙への注入

表-7 載荷試験結果一覧

| 測定項目 | 記号 | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| | P1 | P2 | P3 |
| 破壊時せん断荷重 (tonf) ¹⁾ | 38.9 | 36.1 | 31.4 |
| 降伏時せん断荷重 (tonf) | 28.4 | 26.8 | 26.4 |
| 曲げひび割れ時せん断荷重 (tonf) | -28.4 | -24.3 | -26.8 |
| 曲げひび割れ時せん断荷重 (tonf) | 7.6 | 12.3 | 7.1 |
| 降伏時部材角 (×10 ⁻³ rad) | -7.5 | -10.0 | -6.5 |
| 降伏時部材角 (×10 ⁻³ rad) | 8.0 | 6.7 | 6.7 |
| 曲げせん断ひび割れ時荷重 (tonf) | -6.9 | -8.0 | -6.8 |
| 曲げせん断ひび割れ時荷重 (tonf) | 24.2 | 20.1 | 17.0 |
| 曲げせん断ひび割れ時荷重 (tonf) | -23.9 | -19.8 | -22.3 |

1) 水平相対変位100mm時

材としてイソシアネート系樹脂を適応し、その効果を検討した。なお、樹脂注入時の水頭圧および間隙は、それぞれ0.3kgf/cm²および3mmである。注入後の状態を写真-1に示すが、漏水は全く認められない。以上の結果、イソシアネート系樹脂は、流動性および止水性に優れていることが確認できた。したがって、本工法で漏水を補修する方法は適切であると言える。

(2) W2およびW3試験体の止水性能

W2およびW3のいずれの試験体も初期で若干量の漏水が認められた。しかし、加水12時間後における漏水は認められなかった。この原因としては、加水によるコンクリートの膨張および炭酸カルシウム析出によって漏水部の間隙が充填されたものと考えられる。その後、W3試験体については、水頭圧を1.0~3.5kgf/cm²まで加圧したが漏水には至らなかった。

一方、W2試験体は、水頭圧が1.0~2.0kgf/cm²までの漏水は認められないものの、水頭圧2.5kgf/cm²で打継ぎ部から滲みが生じ更に、水頭圧3.0kgf/cm²では漏水に発展した。この原因としては、4.2(1)項で述べたコンクリートの品質低下に起因しているものと考えられる。なお、写真-1には、各試験体の加水時の漏水状況を示す。

次に、W2およびW3試験体における水頭圧0.1kgf/cm²時の透水係数は、図-10から10~12×10⁻⁸/cm·sec程度と推定される。この値は、一般に漏水が認められない範囲とされていることからTM-5混入の止水性能は極めて良好であると言える。

以上から、TM-5混入は、逆打打継ぎ部の止水性能を向上させる工法としても適切であると考えられる。

5. まとめ

以上の実験から、以下に示す事項が明かとなった。

- a) TM-5混入は、上部と下部コンクリート間の間隙を十分に補償できる。しかし、TM-5混入前のコンクリートに比べて若干の強度低下が予想される。(図-6および表-6参照)
- b) イソシアネート系樹脂を漏水部に注入して止水する工法は、補修方法として優れている。
- c) TM-5混入(直接法)における鉄筋の軸力分担割合は、注入法に比べて小さい。(図-7参照)
- d) TM-5混入の柱部材における打継ぎ部の力学的特性は、一体打ちおよび注入法と同程度であり、a)項で述べた強度低下の影響は認められない。(図-8、9および表-7参照)
- e) TM-5混入は、打継ぎ部の止水性能を向上させる。(表-8参照)

従って、TM-5の混入、およびイソシアネート系樹脂による漏水部の補修は、打継ぎ部の力学的特性並びに耐久性能を向上させるために優れた工法と言える。

表-8 漏水の有・無と漏水の状況

| 水頭圧 (kg/cm ²) | 打継ぎ処理法 | | | |
|------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| | 無処理 (W ₁) | | 注入法 (W ₂) | 直接法 (W ₃) |
| | 無処理 | 漏水補修 | セメント系 | TM-5混入 |
| 0.1 | 全面漏水 | — | 一カ所(若干) | 二カ所(若干) |
| 0.3 | — | 水頭圧が0.3 kgf/cm ² の流水に対してイソシアネート | 無し | 無し |
| 1.0 | — | — | 無し | 無し |
| 2.0 | — | — | 無し | 無し |
| 2.5 | — | 系注入材を注入したが注入後の漏水は認められない。 | 打継部から滲み | 無し |
| 3.0 | — | — | 打継部から漏水 | 無し |
| 3.5 | — | — | — | 無し |

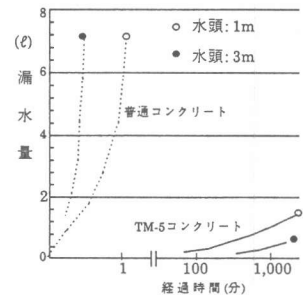
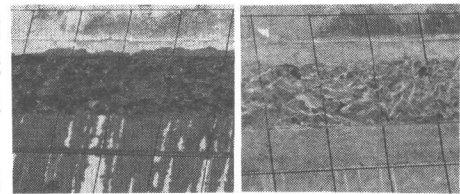
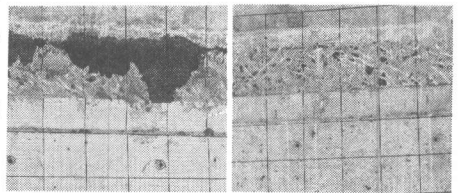


図-10 漏水量の時間経過



W1試験体 (水頭圧=0.3kgf/cm²)



W2試験体 (水頭圧=2.5) W3試験体 (水頭圧=3.5)

写真-1 漏水試験の状況